



Etude par choc laser de l'adhérence de barrières thermiques aéronautiques

Grégory Fabre, Vincent Guipont, Michel Jeandin, Michel Boustié, J.-P. Cuq-Lelandais, Laurent Berthe, A. Pasquet, J.Y. Guedou

► To cite this version:

Grégory Fabre, Vincent Guipont, Michel Jeandin, Michel Boustié, J.-P. Cuq-Lelandais, et al.. Etude par choc laser de l'adhérence de barrières thermiques aéronautiques. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. 9 p. hal-00570504

HAL Id: hal-00570504

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00570504>

Submitted on 1 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude par choc laser de l'adhérence de barrières thermiques aéronautiques

G. Fabre^{1,a}, V. Guipont¹, M. Jeandin¹, M. Boustie², J.P. Cuq-Lelandais²,
L. Berthe³, A. Pasquet⁴, J-Y. Guedou⁴

¹Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, MINES ParisTech, Competence Center for Spray Processing, BP 87, 91003 Evry Cedex, France

²Institut PPRIME, UPR CNRS 3346 (ex- LCD), ENSMA, BP 109, 1 Av. Clément Ader, 86961 Futuroscope, France

³PIMM, UMR CNRS N°8006, ARTS et METIERS ParisTech, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

⁴SNECMA, Villaroche, 77550 Moissy Cramayel, France

^agregory.fabre@mines-paristech.fr

Mots clés : Barrières Thermiques EB-PVD, Test d'adhérence, LASAT, Choc laser

Résumé:

L'estimation de la durée de vie des barrières thermiques aéronautiques (BT) déposées sur les aubes de turbines haute pression nécessite de comprendre les mécanismes induisant l'endommagement entre la sous-couche et la zircone. Le LASAT, LAser Shock Adhesion Test ou essai d'adhérence par choc laser, est une technique exploitant tout son potentiel dans le cas des BTs, en particulier par sa rapidité, simplicité et au comportement optique de la couche de zircone. Ce dernier avantage permet de dimensionner l'endommagement généré sans réaliser de coupes métallographiques. Un nouveau protocole de l'essai LASAT a été mis en place utilisant les ondes de choc bidimensionnelles et exploitant la dépendance entre l'intensité du choc appliqué, le niveau d'adhérence du dépôt, et la dimension de la fissure générée.

Introduction

Les températures de fonctionnement des turbines terrestres ou aéronautiques sont limitées par le point de fusion des matériaux utilisés. Ainsi les évolutions des dernières décennies pour les aubes ont conduit à l'utilisation des superalliages, en particulier base Nickel, avec solidification dirigée afin de générer des structures monocristallines. La géométrie des pièces a aussi été modifiée pour permettre un refroidissement interne et externe par flux d'air. Malgré tout, il apparaît que les gains en température encore possibles en travaillant sur ces technologies soient limités, alors qu'il est nécessaire d'atteindre des conditions encore plus extrêmes pour accroître la puissance et le rendement des moteurs [1]. La dernière avancée mise en place consiste en un fin dépôt de céramique appelé barrière thermique, permettant de réduire la température en surface des aubes de

100 à 200°C. Dans le cas des revêtements d'aubes aéronautiques utilisées pour cette étude, les dépôts sont constitués d'une sous-couche métallique (50µm) recouvrant le superalliage. Cette couche de liaison est surmontée d'une fine épaisseur (quelques µm) d'alumine provenant de la diffusion et de l'oxydation à haute température de l'aluminium. Enfin, le tout est recouvert de la barrière thermique d'une épaisseur de 150 µm de zircone stabilisée à l'yttrine et déposée par EB-PVD.

La ruine des barrières thermiques peut avoir de nombreuses origines [1] [2]. Les particules comme le sable, qui sont aspirées par les moteurs, érodent le dépôt et diminuent son épaisseur. A terme, le superalliage subit des surchauffes locales et son vieillissement thermomécanique est accéléré. La zircone peut aussi se détacher de la sous-couche par ségrégation de composés tel que le S, qui réduisent fortement l'énergie de liaison métal/céramique. Mais le principal phénomène mis en cause provient de la croissance de la couche d'alumine. En effet à haute température, l'aluminium de la sous-couche migre vers l'extérieur pour former une fine couche d'alumine entre la sous-couche et la zircone, et pouvant atteindre 10 µm en fin de vie. Ce dépôt natif est souhaité car il évite l'oxydation du superalliage dans un environnement très sévère. Pendant le refroidissement du système barrière thermique, les désaccords dilatométriques et l'épaisseur croissante d'alumine provoque d'énormes contraintes thermomécaniques conduisant tôt ou tard à la rupture de la liaison métal/céramique et à l'écaillage de la zircone. Cette couche d'alumine est la zone critique du système barrière thermique et fait donc l'objet de nombreuses études pour prédire sa durée de vie. Cependant, il n'existe aucun test rapide utilisé en production afin de qualifier le niveau d'adhérence des BTs déposées sur aubes que ce soit après élaboration ou en cycle de vie du moteur. A ce jour, la qualité d'un lot de production est jugée par cyclages thermiques sur des échantillons témoins d'une série de pièces. Le test vise à déterminer le nombre de cycles thermiques, d'une durée d'une heure à 1100°C, nécessaires pour écailler la barrière thermique via le même processus de contraintes thermomécaniques induites par la croissance de l'alumine. Cette méthode est très longue et surtout n'informe que sur les effets thermiques. De nombreux autres essais ont été étudiés tels que l'indentation interfaciale [3], barb pull-out tests [4], la flexion 4 points [5] et l'essai dit de « plots collés » [6]. Ces tests sont cependant lourds et ne sont pas envisageables à l'échelle industrielle.

L'essai d'adhérence par choc laser (Fig. 1), appelé aussi LASAT (Laser Shock Adhesion Test), est une technique en fort développement ces dernières années de par l'évolution des sources lasers et la rapidité de l'essai. Il consiste à focaliser (A) un laser impulsif, 2 J en 5,2 nanosecondes dans le cas de l'étude, afin de générer un plasma à la surface du superalliage (B). L'expansion brutale de celui-ci génère une onde de choc de compression dans le matériau (C). L'intensité de l'onde peut être accentuée en confinant avec de l'eau le gaz ionisé. L'onde de choc se propage dans le superalliage, traverse l'interface sous-couche/céramique et atteint la surface libre de la zircone où, elle va se réfléchir en onde de choc en traction. Cette poche de traction effectue le parcours inverse (D), traversant l'interface céramique/sous-couche. Si la contrainte mécanique en tension appliquée à l'interface est suffisante, la liaison est rompue (E). La méthode consiste alors à appliquer des flux laser de plus en plus intenses pour croître la contrainte interfaciale générée, jusqu'à provoquer la rupture de la liaison dépôt/substrat. L'énergie ainsi déterminée est appelée seuil d'adhérence du revêtement. L'essai LASAT a déjà été employé avec succès sur des dépôts métalliques et céramiques obtenus par cold spray ou par projection plasma [7].

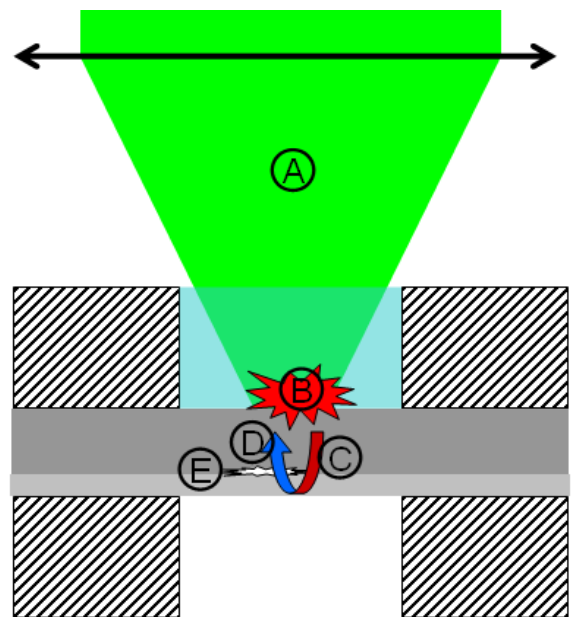


Fig. 1 : Principe de l'essai LASAT

L'application de l'essai d'adhérence par choc laser aux barrières thermiques aéronautiques est ici présentée via une nouvelle procédure du LASAT. En effet, la méthode habituelle consiste à détecter et déterminer le seuil d'énergie au-delà duquel l'interface rompt, mais dans notre cas, une nouvelle approche est utilisée se fondant sur l'évolution de la taille de l'endommagement pour des énergies laser supérieures au seuil. Comme il a déjà été constaté pour des dépôts d'hydroxyapatite projetée par plasma [7], la couche de zircone des revêtements barrières thermiques subit un léger changement de blancheur quand une fissure est générée à l'interface céramique/sous-couche. Se servant de la dimension de cette tache pour connaître la dimension de la fissure interfaciale, la dépendance entre l'énergie laser déposée et la taille de la fissure est déterminée expérimentalement. Dans une seconde partie, l'essai est modélisé et la relation obtenue expérimentalement est expliquée via le code d'éléments finis Abaqus®/explicit, permettant de plus de connaître les niveaux de contraintes appliqués par les ondes de choc.

Matériaux et méthodes :

Les échantillons sont des plaques monocristallines de superalliages base Ni de dimension $50 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ (Fig. 2). Celles-ci ont été revêtues sur une de leur face d'une sous-couche de (Ni,Pt)Al d'environ $45 \mu\text{m}$ et pour finir, d'une couche de zircone yttrée de $180 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Une fine épaisseur de quelques μm d'alumine (résultat de l'oxydation à haute température, est présente entre la couche de liaison et la céramique.

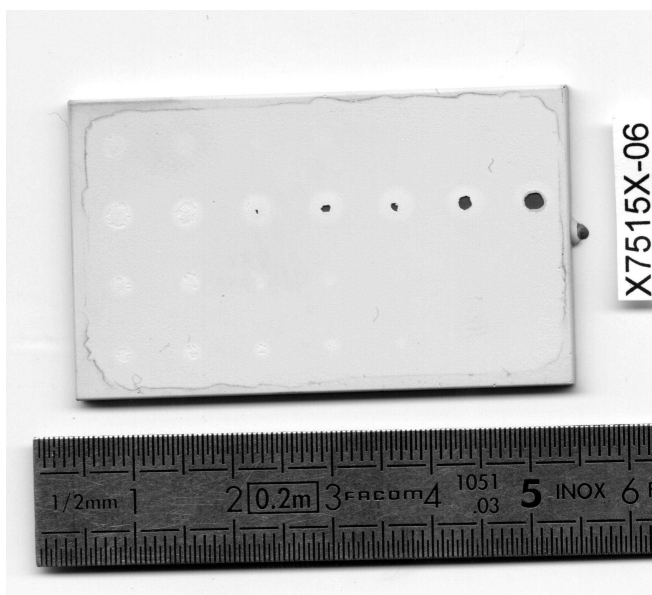


Fig. 2 : Scan d'une plaque ($50 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$) de Barrière Thermique après choc laser

La source utilisée pour appliquer le choc est un laser Nd-YAG équipé d'un doubleur de fréquence et fournissant 2 J en 5,2 ns à 532 nm. Le faisceau est focalisé sur la surface nue du superalliage. Le diamètre de choc utilisé varie de 2 à 4 mm et pour amplifier la contrainte mécanique appliquée, une couche d'eau confine l'expansion du plasma (Fig. 1). L'énergie laser est augmentée progressivement entre chaque choc afin d'observer l'évolution de l'endommagement en fonction de la densité de puissance appliquée. Enfin, les échantillons ont été examinés via un scanner numérique avec une résolution de 600 dpi et une modification du contraste pour mettre en évidence le phénomène de tache blanche. Des coupes suivies d'observations par microscopie électronique à balayage ont conclu l'analyse de l'endommagement.

L'onde de choc et l'évolution temporelle des contraintes dans les matériaux ont été modélisées via Abaqus®/Explicit 6.8 à partir d'un modèle axisymétrique et de données matériaux issues de la bibliographie.

Résultats et discussions

Résultats expérimentaux : L'essai LASAT appliqué aux barrières thermiques peut générer différents types de défauts (Fig. 2). Pour de faibles énergies laser, aucune rupture n'est détectée que ce soit en vue de dessus ou en coupe dans les différentes couches ou aux interfaces associées. Pour des énergies supérieures au seuil LASAT, une tache blanche est observée en vue de dessus, traduisant la formation d'une fissure autour de la couche de l'alumine. La taille de cette tache donc de la fissure associée est croissante avec l'énergie laser déposée. Enfin pour des énergies très supérieures au seuil LASAT, la couche de zircone est écaillée et la sous-couche est mise à nue (Fig. 2). Le cas le plus intéressant correspond au changement de blancheur de la zircone. Cette modification est détectable directement par observation visuelle et peut être facilitée par simple scan numérique avec un contraste accentué. Les coupes métallographiques (Fig. 3) effectuées sur les zones choquées ont montré que cette modification de la réponse optique traduit une décohésion entre la sous-couche et la couche de zircone. En effet, une fissure s'est propagée autour de la couche d'alumine, soit à l'interface alumine/sous-couche, soit sur l'alumine ou même à la base des colonnes de zircone. Dans les cas sans tache blanche détectée, aucune fissure n'est repérée en coupe et l'ensemble des couches et des interfaces sont indemnes. Se basant sur ces observations, la tache blanche est utilisée comme diagnostic de l'état de la barrière thermique après choc laser. Il est intéressant aussi d'observer que l'endommagement induit par LASAT est localisé aux mêmes zones critiques que pour les cas où la barrière thermique s'écaille sur aubes ou par essais de cycles thermiques à haute température. [1] [2].

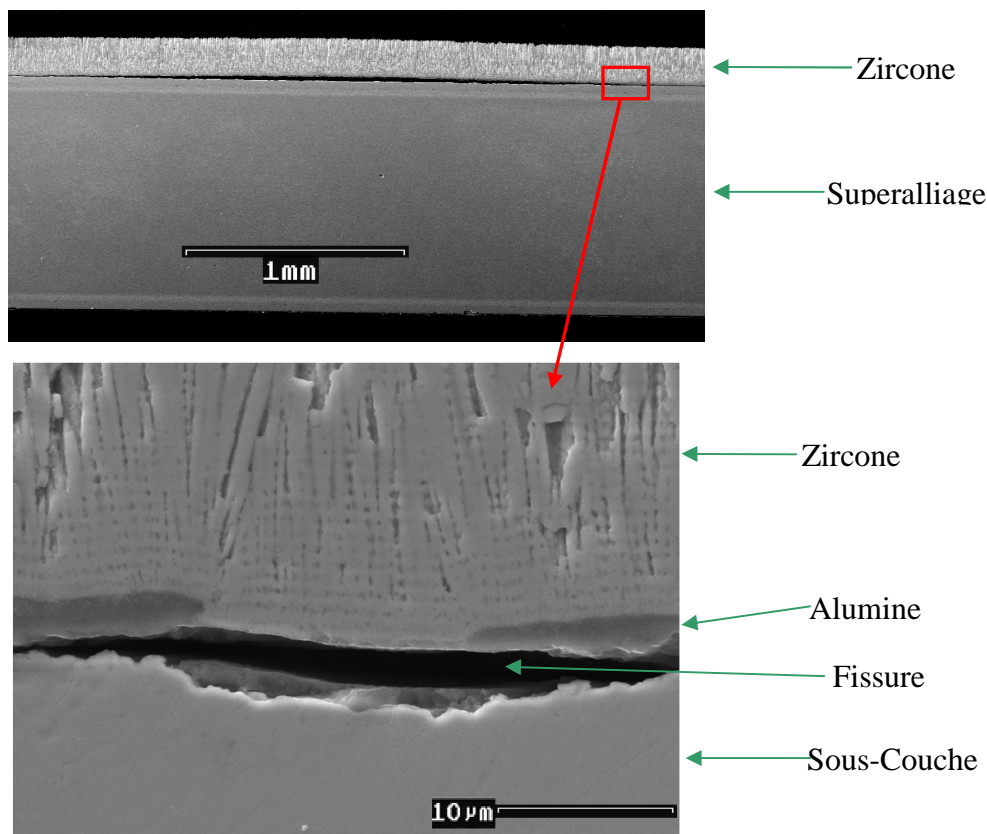


Fig. 3 : Vue en coupe d'une fissure obtenue par choc laser sur barrière thermique

Se fondant sur l'observation de la figure 2, l'évolution de la taille de la fissure a été relevée en fonction de la densité de puissance appliquée pour générer le choc et pour différents diamètres de choc (de 2 à 4 mm). Les courbes (Fig. 4) mettent clairement en évidence l'importance de la géométrie et de l'intensité du choc sur la taille de la fissure générée. Il ressort que pour un diamètre

de choc grand, la taille de la fissure augmente plus rapidement avec l'énergie laser que pour un faible diamètre de choc. De plus, les courbes ne sont pas superposables et il est alors possible de distinguer les conditions de tirs en fonction de l'allure des tracés. Cette évolution conduit à une nouvelle façon d'appliquer l'essai LASAT qui consiste non plus à détecter l'énergie la plus basse qui produit une rupture interfaciale, mais qui se concentre sur l'évolution de cette fissure en fonction de l'adhérence et des conditions de choc. Ainsi, une adhérence peut être déterminée à partir d'un simple et unique choc à la suite duquel la taille de la fissure est comparée aux courbes de références.

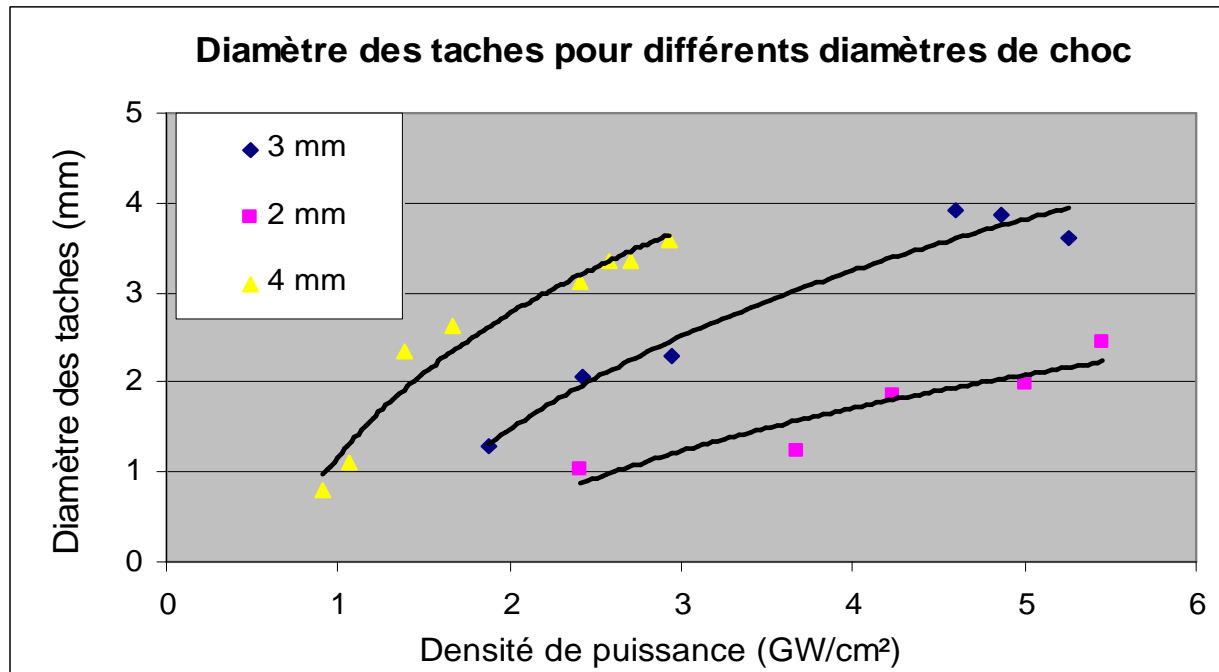


Fig. 4 : Evolution du diamètre des taches en fonction de l'énergie laser pour différents diamètres de choc

Modélisation. La propagation des ondes de choc à travers des matériaux multicouches a déjà été modélisée par Wang et al. [8] pour montrer l'évolution de la contrainte à l'interface en fonction du temps. Dans cette nouvelle étude, une modélisation axisymétrique via Abaqus®/explicit a permis de mettre en évidence les phénomènes mécaniques se produisant le long de l'interface. Le modèle prend en compte le superalliage base Nickel de 2mm d'épaisseur, une couche d'alumine de 1 μ m et la zircone de 180 μ m. Les interfaces sont en liaisons parfaites (« tie »). Le profil temporel de choc est Gaussien et de 22ns à mi-hauteur. Les chocs étant relativement faible et les matériaux connus pour leurs grandes propriétés mécaniques, un comportement purement élastique est considéré pour chacun d'entre eux. Le tableau suivant détaille les données utilisées, issues de la bibliographie :

	Densité ρ (g/cm ³)	Module de Young E (GPa)	Coefficient de Poisson ν
alumine	3,97	350	0,2
superalliage	8,67	130	0,408
Zircone	5,7	44	0,2

Tab. 1 : Propriétés mécaniques utilisées dans le code de calcul

Les cartographies des contraintes au sein des matériaux sont présentées (Fig. 5) aux trois principaux instants de la propagation des ondes. Après l'impulsion laser (Fig. 5.a), l'onde de choc principale (1a) en compression (rouge), aussi appelée onde monodimensionnelle, est générée dans l'axe du tir. Aux extrémités de celle-ci, des ondes semi-circulaires (2a' et 2a''), en traction et en

compression, se propagent dans les directions latérales. Ces ondes bidimensionnelles ont pour effet d'étendre le phénomène de choc (2a') à une surface plus importante que celle du diamètre de laser mais elles apportent aussi l'inconvénient d'atténuer (2a'') l'onde monodimensionnelle. Ces phénomènes ont été mis en évidence par Boustie et al. [9] [10]. Au passage de ces ondes à l'interface superalliage/zircone, le désaccord d'impédance entre les matériaux entraîne une réflexion (1b') partielle des ondes de compression en onde de traction (Fig. 5.b). L'onde transmise (1b) continue sa propagation. Après la réflexion de cette dernière à la surface libre de la zircone, elle effectue le parcours inverse (Fig. 5.c) jusqu'à traverser de nouveau la couche d'alumine. A c'est instant, l'onde monodimensionnelle (1c) dans l'axe du choc fournit la traction la plus importante alors que l'onde bidimensionnelle (2c') apporte un étalement spatial de la contrainte le long de la couche d'alumine. La Figure 3.d donne ce relevé spatial de la contrainte le long de la zone d'intérêt, la couche d'alumine. Ainsi, la traction générée peut endommager le système barrière thermique si la contrainte en traction appliquée par l'onde monodimensionnelle est suffisante. Les effets 2D sont, quant à eux, responsables de l'atténuation des contraintes en s'éloignant de l'axe du choc et expliquent les variations de diamètre de l'endommagement. En effet, en augmentant l'intensité du choc appliqué, la traction supérieure à la limite de rupture de l'alumine s'étend alors sur un diamètre plus grand, expliquant les diamètres de fissures croissants obtenus par l'étude expérimentale.

En fonction du diamètre de choc appliqué, les effets bidimensionnels ont plus ou moins d'importance dans la répartition spatiale des contraintes. En effet, pour un diamètre de choc très important par rapport à l'épaisseur du système substrat + barrière thermique, les effets 2D modifieront la contrainte dans la couche d'alumine sur une distance négligeable par rapport à la zone soumise à la contrainte monodimensionnelle. Au contraire, pour un diamètre de choc petit par rapport à l'épaisseur du système, la part des effets 2D sur la répartition spatiale de la contrainte est beaucoup plus importante. Ceci explique les différentes évolutions de la taille des taches blanches en fonction du diamètre de choc (Fig. 4). Pour des gros diamètres de choc, le diamètre d'endommagement va rapidement atteindre une asymptote du fait de la faible participation des effets 2D. Dans l'autre cas, comme pour un diamètre de 2 mm, les effets 2D étalent l'onde sur une surface plus importante vis-à-vis au diamètre de choc. Ainsi la taille de la fissure augmente plus modérément.

En se basant sur ces observations, il apparaît que la couche d'alumine et les interfaces associées peuvent être soumises à des contraintes différentes durant un seul et unique essai. Il est alors possible de déterminer directement, à partir d'un choc, la contrainte qui entraîne la rupture du système, en adaptant simplement le diamètre du choc à l'épaisseur du système

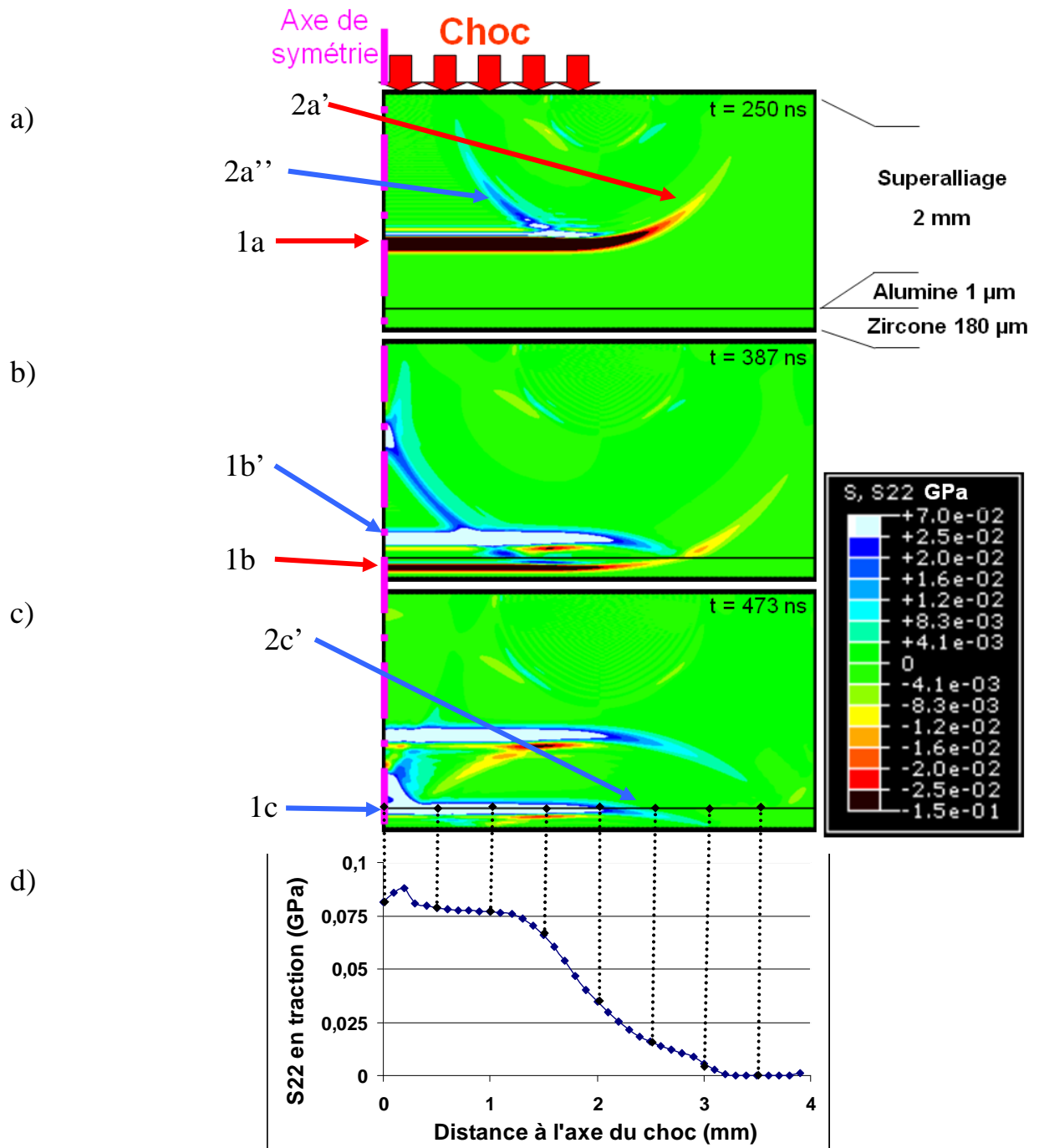


Fig. 5 : Cartographie des contraintes pour un choc de 1 GPa et de rayon 2 mm.
a. Avant transmission partielle à l'interface, **b.** Avant réflexion à la surface libre **c.** Pendant la traversée de l'alumine par l'onde de traction,
d. Contrainte en traction appliquée le long de la couche d'alumine

Conclusion :

Les barrières thermiques aéronautiques ont été caractérisées à partir de l'essai d'adhérence par choc laser (LASAT). L'onde de traction générée par la technique permet de mettre sous contrainte la couche d'alumine et ses interfaces associées qui sont les zones de rupture dans les conditions extrêmes des turbines aéronautiques. De plus, en cas de fissuration dans cette région critique, l'endommagement est directement visible par simple observation de dessus du dépôt, pour lequel un changement de blancheur est détectable. Il a été montré que les tailles de ces taches blanches correspondaient à celles des fissures vues en coupes. En se fondant sur cette observation, les fissures ont été directement mesurées via le dimensionnement des taches blanches, permettant ainsi de se passer des coupes métallographiques. L'évolution des tailles des fissures induites par le LASAT en fonction de l'énergie laser appliquée a montré une dépendance nette menant à une importante innovation dans l'essai d'adhérence par choc laser. En effet, la procédure classique consiste à augmenter l'énergie laser déposée pour le choc jusqu'à endommager l'interface. La valeur ainsi de référence est appelée seuil d'adhérence LASAT, correspondant à la plus faible énergie de choc nécessaire pour rompre la liaison dépôt /substrat. La nouvelle procédure se fonde sur des courbes de références (abaques) donnant l'évolution de la taille de la fissure en fonction de l'énergie laser pour différents niveau d'adhérence. Ainsi, en appliquant un choc et en dimensionnant le défaut induit, l'adhérence du dépôt peut directement être relevée en reportant le point (énergie laser, taille de fissure) sur les abaques de références. Enfin, il a été démontré, via le code de calcul Abaqus®/explicit, le rôle des ondes bidimensionnelles dans l'évolution de la fissure. Cette modélisation a permis de comprendre les phénomènes et les interactions entre les différentes ondes de choc qui peuvent se produire suivant la configuration de l'essai, comme le diamètre de choc.

References

- [1] A. Feuerstein, J. Knapp, T. Taylor, A. Ashary, A. Bolcavage and N. Hitchman: *Technical and Economical Aspects of Current Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbine Engines by Thermal Spray and EBPVD: A Review*. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 17 (2007), p.199
- [2] A.G. Evans, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, G.H. Meier and F.S. Pettit: *Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings*. Progress in Materials Science, 46 (2000), p. 505
- [3] J. Snieszewski, V. Vidal, P. Lours and Y. LE Mout: *Thermal Barrier Coatings adherence and spallation: Interfacial indentation resistance and cyclic oxidation behaviour under thermal gradient*. Surface & Coatings Technology, 204 (2009), p. 807
- [4] S.Q. Guo, D.R. Mumm, A.M. Karlsson and Y. Kagawa: *Measurements of interfacial shear mechanical properties in thermal barrier coating systems by a barb pullout method*. Scripta Materiala, 53 (2005), p.1043
- [5] H.A. Bahr, H. Balke, T. Fett, I. Hofinger, G. Kirchhoff, D. Munz, A. Neubrand, A.S. Semenov, H.J. Weiss and Y.Y. Yang: *Cracks in functionally graded materials*. Materials Science & Engineering, A362 (2002), p.2
- [6] M. Gell, E. Jordan, K. Vaidyanathan, K. McCarron, B. Barber, Y.H. Sohn and V.K. Tolpygo: *Bond strength, bond stress and spallation mechanisms of thermal barrier coatings*, Surface & Coating Technology, 120-121 (1999), p. 53
- [7] V. Guipont, M. Jeandin, S. Bansard, K.A. Khor, M. Nivard, L. Berthe, J.P. Cuq-Lelandais and M. Boustie: *Bond Strength determination hydroxyapatite coatings on Ti-6Al-4V substrates*

using Laser Shock Adhesion Test (LASAT). Accepted for publication Journal of Biomedical Materials Research (2010)

- [8] Y. Liang, X. Bi and J. Wang: *Numerical simulation of laser induced thin film delamination*. Thin Solid Films, 516 (2008), p.971
- [9] M. Boustie, J.P. Cuq-Lelandais, C. Bolis, L. Berthe, S. Barradas, M. Arrigoni, T. De Resseguier and M. Jeandin: *Study of damage phenomena induced by edge effects into materials under laser driven shocks*. J. Phys D.: Applied Physics, 40 (2007), p.7103
- [10] M. Boustie, J.P. Cuq-Lelandais, L. Berthe, C. Bolis, S. Barradas, M. Arrigoni, T. De Resseguier and M. Jeandin: *Damaging of materials by bi-dimensional dynamic effects*. Shock Compression of Condensed Matter, Vol. 955 (2007), p.1323